

УДК 629.735.33

**Сравнительный анализ методов повышения
термостойкости лопаток турбин авиационных
газотурбинных двигателей**

Н.Г. Серёгин, кандидат технических наук, доцент кафедры управления качеством и стандартизации Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

И.А. Сигутин, студент 3 курса Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область.

Выполнен анализ методов повышения термостойкости лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей путём сравнения метода микродугового оксидирования лопаток турбин и метода нанесения на никелевую обложку слоя теплозащитного материала из керамики технологией EB-PVD.

Газотурбинный авиационный двигатель, лопатка турбины теплозащитное покрытие.

Comparative analysis of methods for increasing the thermal stability of turbine blades of aircraft gas turbine engines

N.G. Seregin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Quality Management and Standardization of the State Budgetary Educational Institution of

Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonova», Korolev, Moscow region,

I.A. Sigutin, 3rd year student of the State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonova», Korolev, Moscow region.

The analysis of methods for increasing the thermal stability of turbine blades of aircraft gas turbine engines by comparing the method of micro-arc oxidation of turbine blades and the method of applying a layer of heat-shielding ceramic material to the nickel cover using the EB-PVD technology.

Gas turbine aircraft engine, turbine blade, heat-shielding coating.

Предмет исследования

На данный момент лопатки турбин авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) являются наиболее важными и дорогостоящими деталями в ГТД. Поэтому с целью повышения экономической эффективности и надежности газотурбинных двигателей необходимо совершенствовать методы изготовления лопаток ГТД, а именно, их стойкость к воздействию внешней среды и жаропрочность. В современных авиационных ГТД применяют лопатки из жаростойких материалов, которые подвергаются интенсивным термическим и механическим нагрузкам в условиях воздействия на них внешней агрессивной среды обладающей, как правило, коррозионным эффектом. Надежность лопаток турбин определяет ресурс самих ГТД, а, следовательно, лётно-технические и

эксплуатационные характеристики летательных аппаратов [1], а также безопасность полетов.

Для обеспечения надежности лопаток турбин газотурбинных двигателей разработаны различные методы, в том числе методы улучшения их теплозащитного покрытия (ТЗП). ТЗП активно используются для защиты лопаток ГТД от чрезмерных температур и высокотемпературного окисления, а потому теплозащитные покрытия лопаток турбин – это один из наиболее эффективных способов повышения технических характеристик газотурбинных двигателей. На данный момент ТЗП изготовленные из керамики с низкой теплопроводностью, находят все более широкое применение в процессах производства ГТД, поскольку низкая теплопроводность позволяет данным покрытиям выполнять функцию теплозащитных покрытий.

Целью данной работы является анализ методов повышения термической стойкости лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей путём сравнения метода микродугового оксидирования (МДО) лопаток турбин и метода нанесения на никелевую обложку слоя теплозащитного материала из керамики EB-PVD для выявления наиболее перспективного метода покрытия лопаток турбин и дальнейшего совершенствования серийных методов по их обработке.

Методы и средства

Метод микродугового оксидирования лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей. Микродуговое оксидирование – это электрохимический процесс окисления, происходящий преимущественно на поверхности металлов вентильной группы (то есть металлов, на поверхности которых вырабатывается оксидная пленка), а также их сплавов, например, сплавов алюминия, титана, магния, тантала и других в плазме из электролита, который содержит щелочные растворы натрия, калия, различных фосфатов и прочих легирующих элементов, с целью

получения оксидных покрытий. Покрытия, которые были получены при помощи данной технологии, обладают весьма широким спектром применения. Технология МДО позволяет наносить покрытие, как на новые изделия, так и для восстановления покрытий лопаток турбин после износа, также она сокращает время нанесения покрытия за счет наличия микродуговых разрядов, позволяет задействовать меньшее количество оборудования и экономит расход воды. Покрытия, полученные при использовании технологии нанесения ТЗП методом МДО, обладают разнообразными функциональными свойствами, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – функциональные свойства МДО-покрытий

1) сопротивляемость коррозии
2) жаростойкость
3) износостойкость
4) электроизоляционные
5) защитные
6) защитно-декоративные

Благодаря такой универсальности и многофункциональности данных слоев, выполненных методом микродугового оксидирования, обеспечивает применение во многих промышленных отраслях. В основе процесса МДО располагается высокотемпературная электрохимическая реакция в виде микродуговых разрядов на поверхности деталей, которые помещены в электролит, после чего, в результате данной реакции начинает формироваться МДО-покрытие толщиной до 400 мкм, которое обладает высокой прочностью, твердостью, тепло- и электропроводностью, низкой химической активностью и

прочими свойствами покрытий, полученных методом микродугового оксидирования. В процессе образования МДО-покрытия электрический режим обработки, а также состав электролита позволяют регулировать прочность сцепления подложки и покрытия (адгезия). Процесс оксидирования поверхности происходит под напряжением в 450-500 В, так как при таком напряжении активируется процесс микродугового оксидирования и на поверхности подложки возникают микродуговые разряды в точках пробоя барьерного слоя, но процесс формирования покрытия начинается еще до появления искр.

Рассматривая процедуру образования МДО-покрытия, можно выделить то, что в области пробоя анодной плотной пленки резко повышаются давление и температура (вследствие перехода энергии электронов в тепловую энергию), а часть металла-основы переходит в раствор, где пребывает в виде ионов, в то время, пока другая часть металла, подвергшегося плавлению, взаимодействует с электролитом и, тем самым, образует МДО-покрытие. Адгезия покрытий микродугового оксидирования с обложкой обеспечивается именно данным слоем. На рисунке 1 представлено изображение МДО покрытия.

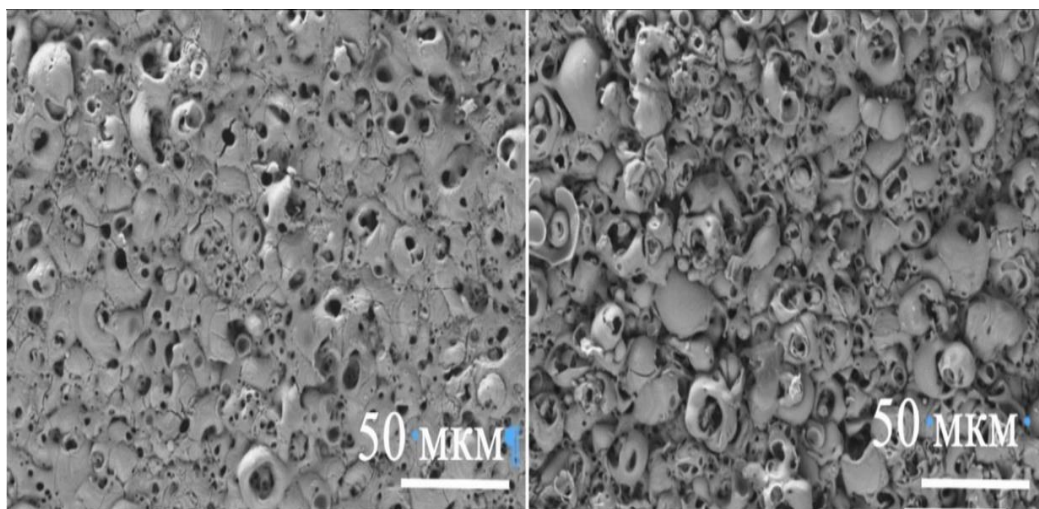


Рисунок 1 – изображение МДО покрытия

На рисунке 2 представлена слоистая структура МДО-покрытия.

МДО-покрытие состоит из трех слоев:

- 1) технологический (внешний) слой – рыхлый, наиболее пористый слой.
- 2) рабочий (внутренний) слой – плотный, имеет высокую микротвердость.
- 3) переходный слой – тонкий (от 0,01 до 0,1 мкм), располагается между слоем оксида и материалом подложки (основы), обозначенный цифрой 4 (см. рисунок 2).

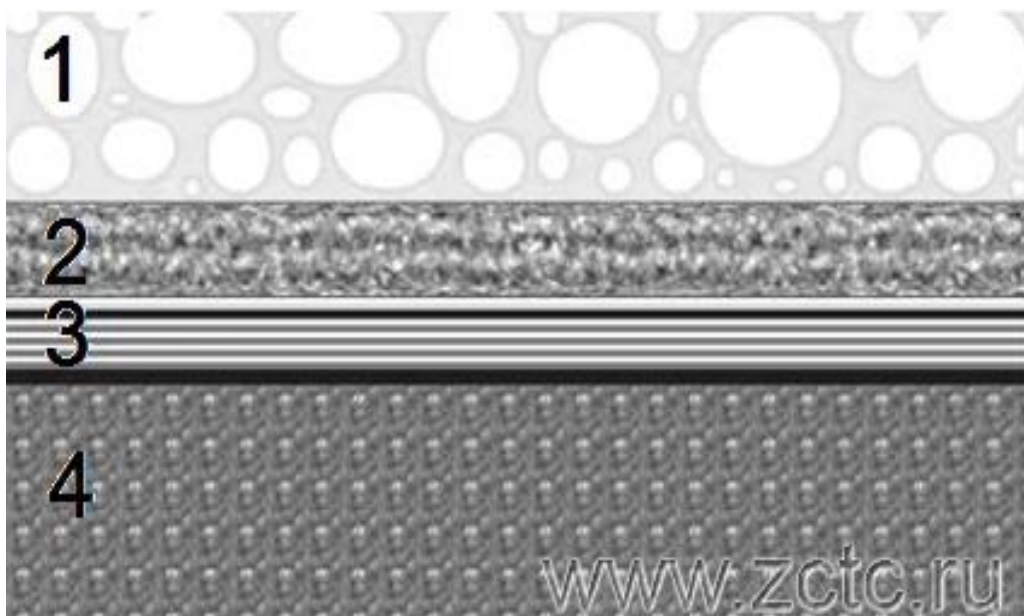


Рисунок 2 – изображение слоистой структуры МДО-покрытий

Оборудование, используемое технологией микродугового оксидирования, является аналогичным оборудованием, применяемым при различных гальванических процессах. Аппаратурное обеспечение для, применяемое при процедуре микродугового оксидирования наиболее схоже с оборудованием, применяемым при анодировании алюминия (как и сама процедура).

Принципиальные различия двух обозначенных выше процедур (МДО и анодирование) заключаются в применяемых источниках питания (при процессе МДО используется большее напряжение, которое вызывает микродуговые разряды в точках пробоя поверхности основы), электролитах, а также в скорости образования защитного покрытия.

Непосредственно в процессе обработки лопаток турбин ГТД технологией микродугового оксидирования на поверхности деталей образуется слой, который состоит из оксида металла подложки, следовательно, это приводит к образованию МДО-слоя, который способен обладать микротвердостью ~ 21 ГПа. Так как твердость поверхности имеет прямую корреляционную зависимость с ее износостойкостью, то, следовательно, МДО-покрытие может существенно повысить износостойкость лопаток газотурбинных двигателей. Также необходимо отметить то, что при применении процедуры по постепенному нагреву деталей термостойкость МДО-покрытия ограничивается лишь температурой плавления металла из которого состоит сама деталь, что дает возможность создавать детали с повышенной стойкостью к термоциклическим и термическим нагрузкам. Следовательно, модифицированный поверхностный слой, который обладает повышенной твердостью можно получить методом микродугового оксидирования на поверхности лопаток турбин ГТД из композиционного материала в основе которого лежит Mg-B.

Главные преимущества микродуговых покрытий представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные преимущества МДО-покрытий

1) возможность производства сверхпрочных покрытий, которые уступают по прочности только алмазам
2) возможность получения покрытий различного цвета без дополнительной покраски
3) возможность нанесения покрытий как на внутренних, так и на внешних поверхностях изделий любой формы
4) повышенное сопротивление коррозионной усталости
5) отсутствие необходимости в предварительной обработке поверхности

Недостатки технологии МДО представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные недостатки МДО-покрытий

1) при образовании покрытия существенно возрастает шероховатость поверхности, но ее можно регулировать.
2) повышенный расход электроэнергии, из-за чего обработка крупногабаритных деталей существенно затрудняется.
3) использование специальных источников тока, которые будут обеспечивать высокое рабочее напряжение и плотность тока.

Свойства покрытий методом МДО приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные свойства покрытий методом МДО

Свойства	Значения свойство покрытий, нанесенных методом МДО
Толщина, мкм	До 400
Адгезионная прочность, МПа	350
Микротвердость, ГПа	21
Пробойное напряжение, В	До 6000
Теплостойкость, °C	До 2500
Коррозионная стойкость	1-й балл по десятибалльной шкале (наивысший)
Пористость, %	От 2 до 50 (регулируемая)
Износостойкость	На уровне твердых сплавов
Теплопроводность, Вт/(м*К)	0,14-0,48

Метод нанесения на никелевую обложку слоя теплозащитного материала из керамики EB-PVD. Никелевая основа, на которую непосредственно наносят теплозащитное покрытие является весьма распространенной, так как рабочая температура обложки из данного материала на основании прочностных характеристик может достигать 1150°C [2-3]. Весьма широкое распространение среди керамики приобрела система типа $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ (YSZ). Система YSZ имеет ряд свойств, приведенных в таблице 5, из-за которых данный материал является наилучшим [4–5].

Таблица 5 – основные свойства покрытия системы YSZ

1) коэффициент удельной теплопроводности данного состава является одним из наиболее низких среди всех керамических материалов при высокой температуре (свыше 1000°C) и измеряется в диапазоне 2,5-3 Вт/м*К
2) высокий температурный коэффициент линейного расширения
3) снижение температуры на поверхности жаростойкого соединительного слоя лопатки позволяет существенно (в 2 и более раз) повысить ее ресурс
4) ресурс теплозащитного покрытия зависит от состава жаростойкого соединительного слоя, конструкции и технологии нанесения теплозащитного покрытия
5) наличие керамического слоя при тепловых потоках $\sim (10^6 - 10^7)$ Вт/м ² обеспечивает снижение температуры на поверхности лопатки турбины высокого давления на величину $\sim 100^\circ\text{C}$ при толщине керамического слоя ~ 150 мкм
6) при эксплуатации слоя YSZ при температуре свыше 1200°C наблюдается спекание кристаллитов покрытия

Me₂Zr₂O₇ - покрытие, состоящее из керамики на основе цирконатов, которое является наиболее перспективной альтернативой YSZ-покрытия, однако необходимо отметить, что поиск других альтернатив покрытию системы YSZ все еще продолжается. Теплопроводность такого покрытия составляет около 1–1,5 Вт/(м·К) и не предрасположено спеканию при температурах до 1200–1400°C [6–9].

EB-PVD - это технология нанесения теплозащитных покрытий с внешним керамическим слоем, обладающих столбчатой структурой, а также вертикальными каналами, благодаря чему, данный метод применяется достаточно часто, так как наличие вертикальных каналов и столбчатой

структуры делают ТЗП более устойчивым к деформации в направлении, перпендикулярном столбам, также такая структура ТЗП позволяет понизить коэффициент теплопроводности.

На рисунке 3 представлено изображение микроструктуры ТЗП, полученного методом EB-PVD в масштабе 100 мкм.

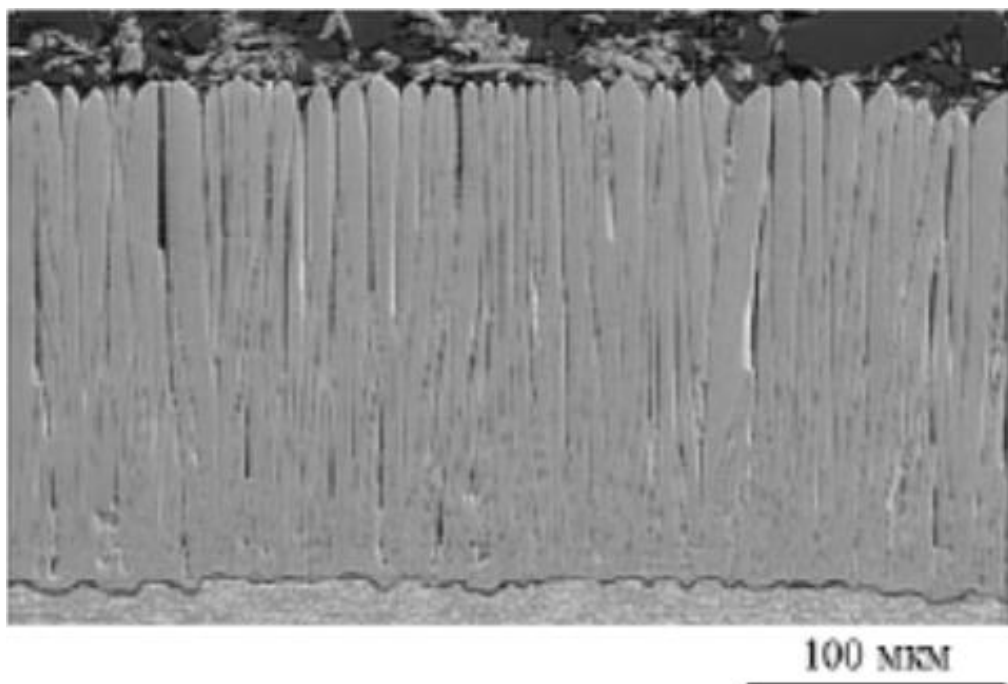


Рисунок 3 – микроструктура теплозащитного покрытия, полученного методом EB-PVD в масштабе 100 мкм

На рисунке 4 представлено изображение микроструктуры теплозащитного покрытия, полученного методом EB-PVD в масштабе 2 мкм.

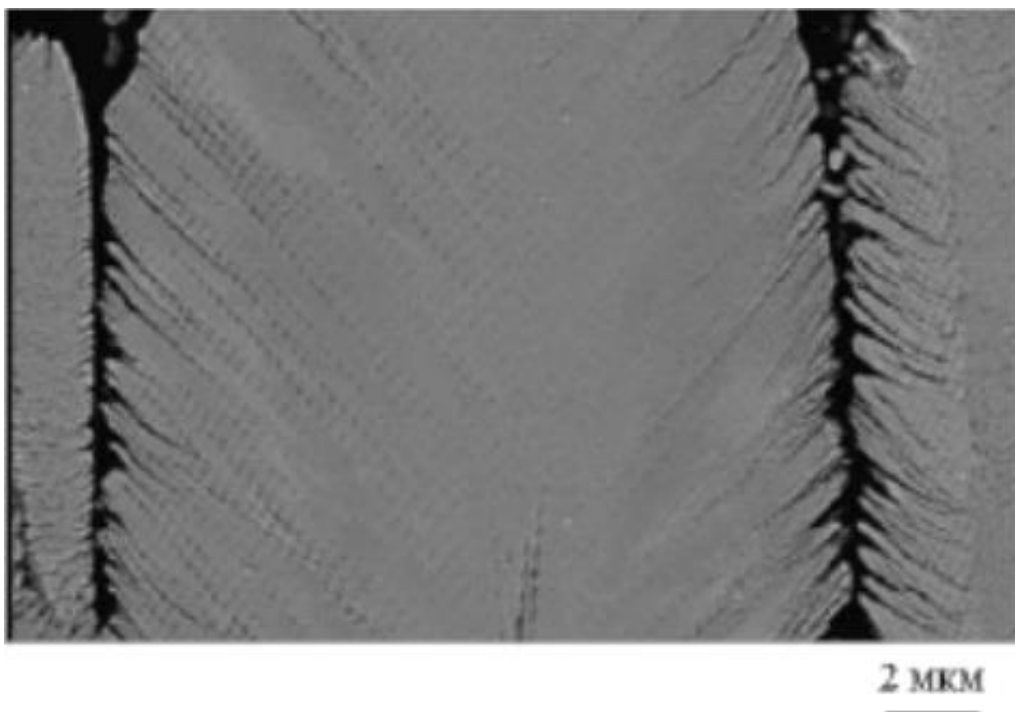


Рисунок 4 – микроструктура теплозащитного покрытия, полученного методом EB-PVD в масштабе 2 мкм

Образование керамики, происходящее перпендикулярно (вертикально) к поверхности основы с образованием в покрытии вертикально расположенных каналов (в виде тонких кристаллитов) придает керамическому слою высокую термостойкость на поверхности металлической основы в условиях интенсивных теплосмен, которым подвергаются лопатки газотурбинных двигателей во время эксплуатации. Покрытие, полученное методом EB-PVD, обладает малой шероховатостью, что не препятствует обтеканию лопаток ГТД.

Недостатками метода нанесения покрытий EB-PVD являются высокая энергозатратность метода, громоздкость оборудования, высокая стоимость оборудования и технологии производства теплозащитных покрытий, а также сложность технологического процесса нанесения

теплозащитного покрытия, так как для повышения адгезии необходима гладкая поверхность с шероховатостью 1-3 мкм. На таблице 6 представлены свойства покрытия методом: EB-PVD.

Таблица 6 – Основные свойства покрытий методами EB-PVD

Свойства	Значения свойств покрытий, нанесенных методом EB-PVD
Шероховатость, мкм	1,5
Адгезионная прочность, МПа	400
Модуль упругости, ГПа	90
Относительная скорость эрозии	1
Теплопроводность, Вт/(м*К)	1,5-1,9

На рисунке 5 представлено изображения поры EB-PVD-покрытия.

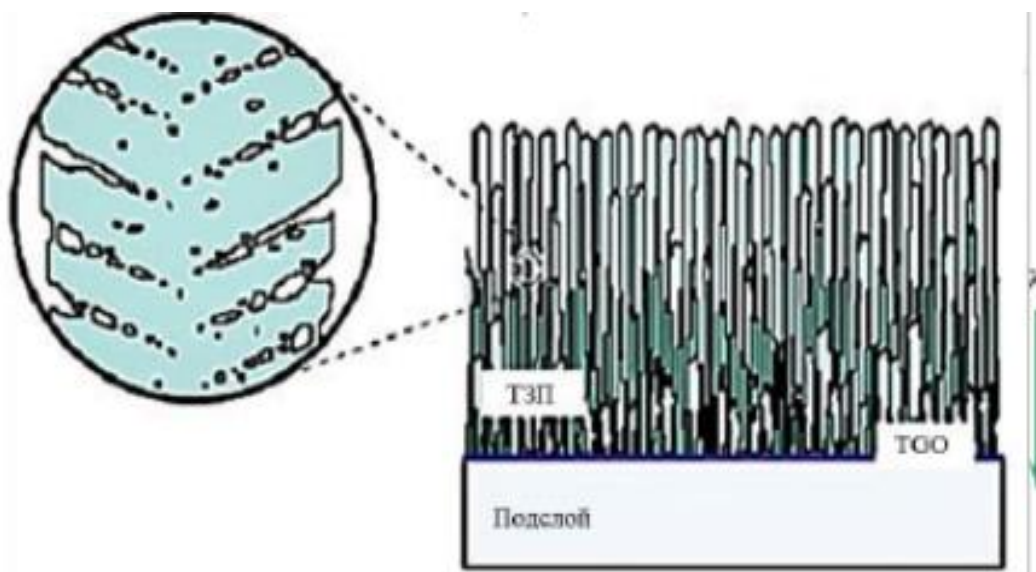


Рисунок 5 – Схематическое изображение морфологии поры EB-PVD-покрытия

Результаты исследования

В настоящее время существует множество различных методов нанесения теплозащитных покрытий на подложку лопаток газотурбинных двигателей, однако метод микродугового оксидирования является качественно новой ступенью на векторе совершенствования упрочняющей обработки поверхностей лопаток ГТД, в процессе которого оксидный слой формируется благодаря взаимодействию электрохимических и плазменных механизмов.

Подводя итоги сравнительного анализа методов повышения термостойкости лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей наиболее перспективным методом, по мнению авторов, является технология МДО-покрытий по следующим причинам:

- экологичность процедуры, благодаря отсутствию сточных вод от подготовительных операций.
- повышенная износостойкость покрытий.
- пористость МДО-покрытий может быть существенно снижена путем проведения дополнительной обработки до 2-3%.
- низкая теплопроводность.
- отсутствие необходимости предварительной специальной подготовки поверхности подложки.
- возможность получения оптимальной толщины покрытия (400 мкм)

Литература:

1. Серёгин Н.Г., Пудовченко П.Ю. Формирование требований к летательным аппаратам // М.: Информационно-технологический вестник. 2020. № 3 (25). С. 60-66.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
3. Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток

ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 43–46.

4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электронный Научно-технический журнал 2013. №2. С. 01.

5. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. 60-70.

6. Чубаров Д.А., Будиновский С.А, Выбор керамического материала для теплозащитных покрытий лопаток авиационных турбин на рабочие температуры до 1400°С // Труды ВИАМ: электронный Научно-технический журнал. 2015. №4. С. 07.

7. Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С 43-46.

8. Levi C.G. Emerging materials and processes for thermal barrier system // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2004. №8. P. 77-91.

9. Clarke D.R., Phillpot S.R. Thermal barrier coating materials // Materialstoday. 2005. Vol. 8. Issue 6. P. 22-29.